



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

10-99-308

На правах рукописи
УДК 681.321.0

С-506

СМИРНОВ
Виталий Анатольевич

**МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ
МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК ЛВЭ ОИЯИ**

Специальность: 01.04.01 — техника физического эксперимента,
физика приборов, автоматизация физических исследований

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Дубна 1999

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований

Научный консультант - доктор физико-математических наук,
профессор
МАЛАХОВ Александр Иванович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор
ГЛАГОЛЕВ
Виктор Викторович

доктор физико-математических наук,
профессор
КУРЕПИН
Алексей Борисович

доктор физико-математических наук,
профессор
НИКИТИН
Владимир Алексеевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Московский инженерно-физический институт, г. Москва

Защита диссертации состоится «___» _____ г. в ___ часов на заседании
диссертационного совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан «___» _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Лихачев М.Ф.

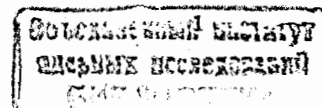
Экспериментальные исследования, проводимые в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ на протяжении последних 25 лет в области физики частиц высоких энергий (ФВЭ) и релятивистской ядерной физики (РЯФ), явились основным стимулом исследований по созданию новых методов и средств организации многоканальных многопроцессорных систем сбора данных.

В начале 70-х годов в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ для проведения исследований на синхрофазотроне и синхротроне ИФВЭ (Протвино) стал создаваться ряд экспериментальных физических установок нового типа с использованием электронных методов регистрации информации, получаемой с детекторов. В практике физического эксперимента начали широко использоваться (1) такие многоканальные детекторы, как проволочные камеры, сцинтилляционные, черенковские и полупроводниковые годоскопические системы; (2) малые ЭВМ, специализированные для процессов управления, и (3) электронно-вычислительная аппаратура модульного типа для регистрации информации с детекторов, ее преобразования в цифровой код и передачи в ЭВМ.

На протяжении последующих лет происходило непрерывное совершенствование технических средств эксперимента, которое было направлено (1) на достижение более высокой точности в определении основных величин, характеризующих взаимодействие частиц и ядер, (2) на регистрацию процессов с высокой множественностью появления вторичных частиц и (3) на выделение редких событий в условиях высокого фона. Именно эти факторы обусловили рост числа каналов регистрации и соответствующее увеличение объема электронной аппаратуры в системах сбора данных (ССД), увеличение скорости регистрации событий, усовершенствование средств синхронизации и оперативно-го контроля за ходом эксперимента.

Все это привело к необходимости дальнейшего развития и совершенствования методов построения ССД и определило цели настоящего исследования:

- выработку архитектурных принципов построения многоканальных многопроцессорных систем сбора данных;
- проведение исследований, направленных на уменьшение мертвого времени установки;



- организацию параллельных каналов считывания информации с детекторов установки;
- создание алгоритмов и средств, обеспечивающих проведение операций по упаковке данных и их первичной сортировке в реальном масштабе времени;
- создание средств организации многоканальных многопроцессорных систем сбора данных;
- разработку средств объединения модулей ядерной электроники, вычислительной техники и всех используемых компьютеров и процессорных модулей в единый комплекс;
- создание аппаратуры, алгоритмов и программ, предназначенных для организации первичной обработки информации, а также организации оперативного контроля за ходом проводимых экспериментов.

Диссертация написана на основе работ, выполненных в течение 1973-1998 годов в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ [1-49].

Экспериментальные исследования, проводимые в ЛВЭ ОИЯИ, всегда были направлены на решение самых современных задач в области ФВЭ и РЯФ. Актуальность этих исследований во многом определялась развитием ускорительной базы Лаборатории. В начале 70-х годов в Лаборатории на синхрофазотроне впервые были получены пучки релятивистских дейтронов. В последующие годы на синхрофазотроне были ускорены пучки релятивистских ядер и поляризованных дейтронов. В 1993 г. в Лаборатории высоких энергий введен в действие первый специализированный сверхпроводящий ускоритель ядер на высокие энергии НУКЛОТРОН. Все это определило **актуальность** разработки и создания аппаратных и программных средств, обеспечивших построение систем автоматизации и сбора данных для ряда уникальных экспериментальных физических установок, а также ряда систем и стендов базовых установок Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Это - ФОТОН, АЛЬФА, БИС, КРИСТАЛЛ, ДИСК, СЯО, ГИБС, СФЕРА, медленный вывод пучка частиц из синхрофазотрона и др.

Уровень требований к организации систем сбора данных во многом определяет обширная программа исследований Лаборатории, а также широкое участие ученых ЛВЭ в работе международных коллективов при проведении исследова-

ований в ЛВЭ, ИФВЭ (Протвино) и ряде других ведущих научных центров (ЦЕРН, ФНАЛ, ДЕЗИ и др.). Экспериментальные установки Лаборатории создавались для проведения исследований на ускорителях заряженных частиц и были ориентированы на импульсный анализ и идентификацию множества вторичных частиц в области энергий от 100 МэВ до нескольких десятков ГэВ. Эти обстоятельства привели к необходимости построения высокопроизводительных ССД, которые позволили бы регистрировать достаточное количество событий изучаемого физического процесса за минимально возможное время ее экспозиции на ускорителе. Строгость задания заранее определенной выборки с детекторов в некотором интервале времени определяет долю полезных событий, которая содержится во множестве всех зарегистрированных событий. Ужесточение критериев отбора ведет к увеличению доли полезных событий, но при этом может привести к потере или не регистрации значительной части актов изучаемого физического процесса. Компромисс в выборе критериев первичного отбора возможен лишь при тщательном анализе специфических особенностей конкретной физической установки и изучаемого явления.

Основной задачей ССД является регистрация **максимально возможного количества полезных событий**. На этот процесс в первую очередь влияют эффективность отбора событий и время, затрачиваемое на чтение данных о событии, что во многом зависит от способа организации ССД.

Следует отметить, что каждая экспериментальная установка является уникальным сооружением, основанным на индивидуальном наборе детекторов, и предназначена для проведения ряда специфических исследований. Архитектура ССД, создаваемых для этих установок, должна отражать их специфику и уникальность, а также нести в себе элементы универсальности и возможности перестройки под решение новой экспериментальной задачи.

Научная новизна и значимость диссертационной работы заключаются в предложении и реализации ряда новых крупных оригинальных методических решений и создании на их основе уникальной экспериментальной аппаратуры. Внедрение этих решений внесло значительный вклад в организацию высокопроизводительного сбора данных с экспериментальных установок, работающих по программе исследований ЛВЭ ОИЯИ, и тем самым способствовало ускоре-

нию научно-технического прогресса в области физики частиц высоких энергий и релятивистской ядерной физики.

Предложены оригинальные методы построения многоканальных многопроцессорных ССД в виде единой информационной системы. ССД объединяет электронные модули, ответственные за регистрацию сигналов с детекторов и их преобразование в цифровой код, аппаратные процессоры и запоминающие устройства, необходимые для осуществления предварительной обработки зарегистрированной информации. Особое место играют методы передачи информации между модулями системы, которые реализованы за счет разработки интерфейсов ЭВМ и каналов внешней сети, разнообразных контроллеров, модулей синхронизации и других вспомогательных модулей. В системе предусмотрены специальные меры по обеспечению необходимого информационного пространства. Предложены средства по объединению однородных информационных каналов, выполненных в одном и том же стандарте, и магистралей, выполненных в различных стандартах. В качестве отдельных сегментов информационных каналов используются такие стандартные магистрали, как САМАС, VME, Fastbus и др. Для установок с требованиями, превышающими возможности стандартных средств, разработаны специализированные средства передачи информации. Решены проблемы по созданию интерфейсов, ориентированных на максимальное использование таких ресурсов каналов ввода-вывода ЭВМ, как пропускная способность и время отклика на сигналы прерывания. Обеспечено выполнение условий для приема максимально возможного количества событий изучаемых в эксперименте процессов. Для этого обеспечено решение проблем, связанных с минимизацией мертвого времени при приеме информации на одно событие. Предложены методы синхронизации процесса сбора данных по сигналам ускорителя, управляющих процессоров, подсистем отбора событий и командам оператора. Разработаны методы и средства контроля за ходом эксперимента в реальном масштабе времени. Методические исследования, связанные с разработкой аппаратных и программных средств организации многоканальных ССД в Лаборатории высоких энергий, проводились для архитектуры ССД как с централизованным, так и с распределенным управлением.

Практическая ценность полученных результатов состоит в решении проблем по организации многоканальных многопроцессорных систем сбора данных реального времени для экспериментальных установок, предназначенных для работы на ускорителях заряженных частиц.

Методы синхронизации процесса сбора данных по сигналам ускорителя, систем отбора событий и командам оператора, разработанные для первых систем сбора данных на линии с мини-ЭВМ, используются до настоящего времени.

Системный крейт САМАС послужил основой для создания следующих систем: измерения и контроля параметров на Синхрофазотроне; сбора данных для экспериментальных установок ЛВЭ БИС-2, Альфа, Кристалл, СЯО, ДИСК-2 и прототипа адронного калориметра установки ДЕЛФИ (ЦЕРН); автоматизации бустерного синхротрона в ИФВЭ (Протвино). Функциональные возможности многопроцессорной магистрали системного крейта КАМАК стимулировали разработку для него ряда дополнительных модулей, которые обеспечивали выполнение специфических функций управления потоками принимаемых данных на установке БИС-2 и прототипе адронного калориметра установки ДЕЛФИ.

Проведение экспериментов на установках, которые были созданы с использованием средств, рассматриваемых в диссертационной работе, позволило получить целый ряд фундаментальных результатов в областях ФВЭ и РЯФ:

- дифференциальные сечения рождения η -мезонов при 3,3 ГэВ/с (установка ФОТОН);
- обнаружение частиц с ненулевым квантовым числом "очарование", характеристики рождения нейтронами с энергией 40 ГэВ Λ_c гиперонов, антигиперонов, очарованных барионов и узкого барионного резонанса $N(1960)$ на установке БИС-2;
- спектры фрагментации релятивистских ядер дейтерия и гелия и данные по возбуждению дельта изобар в ядрах в процессе перезарядки ^3He в тритий на установке АЛЬФА;
- сечения кумулятивного рождения мезонов, протонов и барионных систем на установке ДИСК-2;

- характеристики процессов упругого и неупругого взаимодействия легких ядер, обнаружение высоковозбужденных состояний и дифференциальные сечения выхода ${}^4\text{He}$ на установке СЯО;
- экспериментальные доказательства о возможности отклонения пучка протонов с энергией 8,4 ГэВ изогнутым монокристаллом на установке КРИСТАЛЛ;
- свойства образования экзотических ядер (гиперядер, дельта-ядер) на установке ГИБС;
- величины А-зависимости сечений фрагментации релятивистских дейтронов в кумулятивные π^- -мезоны на ядрах углерода, алюминия, меди и свинца; спектры быстрых кумулятивных π^- -мезонов в зависимости от множественности сопровождающих заряженных частиц на установке СФЕРА.

Создание средств измерения и контроля параметров на Синхрофазотроне обеспечило сокращение времени, необходимого для настройки ускорителя и для перехода с одного режима работы на другой. Это в значительной степени способствовало улучшению параметров пучка частиц, выводимого на физические установки. Ряд разработок обеспечил создание стенда по организации автоматизированного измерения температуры сверхпроводящего модельного синхротрона СПИН и тем самым способствовал развитию методов по организации криогенных ускорителей. Использование драйвера ветви САМАС для шины Qbus позволило создать систему управления функционированием источника Полярис - криогенного источника поляризованных дейтронов для ускорительного комплекса ЛВЭ.

Автор защищает настоящей работой:

1. Создание новых, научно обоснованных технических решений по разработке архитектурных принципов построения многоканальных многопроцессорных систем сбора данных для экспериментальных установок, работающих в области физики частиц высоких энергий и релятивистской ядерной физики. Внедрение этих решений вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса.
2. Разработку первого в странах-участницах ОИЯИ устройства с управлением от многочисленных источников (оригинальный системный крейт САМАС), которое обеспечивает создание универсальных многоканальных многопроцес-

- сорных систем сбора данных, ориентированных на работу в реальном масштабе времени в экспериментальных установках в областях ФВЭ и РЯФ.
- 3. Создание многоканального многопроцессорного информационного комплекса реального времени, являющегося основой для организации системы контроля и управления параметрами медленного вывода пучка частиц Синхрофазотрона.
 4. Разработку и создание многоканальной системы сбора данных и комплекса аппаратных и программных средств, впервые в странах-участницах ОИЯИ обеспечивши регистрацию экспериментальных данных на линии с малой ЭВМ в реальном масштабе времени при проведении исследований радиационных распадов резонансов на экспериментальной установке ФОТОН.
 5. Разработку высоконадежного и экономически целесообразного устройства для широкого круга лабораторных применений по организации однопроцессорных многоканальных информационных систем, управляемых микроЭВМ с магистралью Qbus.
 6. Разработку алгоритма работы и создание аппаратного процессора по управлению процессами сжатия информационно-избыточных данных и перекодировки данных с детекторов годоскопического типа в режиме реального времени. Работы по интеграции этого процессора в состав систем сбора данных экспериментальных установок БИС-2 и АЛЬФА.
 7. Создание впервые в странах-участницах ОИЯИ нового способа организации систем сбора данных с использованием магистрально-модульной шины VME, что обеспечивает управление системой от многочисленных источников и организацию параллельной работы нескольких процессорных устройств, а также позволяет объединять в рамках единой информационной системы электронную аппаратуру, выполненную в различных стандартах (САМАС, FASTBAS, VME). Организацию системы сбора данных спектрометра СФЕРА на одном из этапов ее создания на основе этого способа.
 8. Разработку комплекса аппаратуры в стандарте VME и внедрение его в состав системы сбора данных спектрометра СФЕРА и многопроцессорной подсистемы управления циклом сверхпроводящего синхротрона СПИН.
 9. Результаты исследований по созданию многоцелевого микропрограммируемого драйвера ветви САМАС в стандарте VME, позволяющего образовывать

до восьми стандартных ветвей CAMAC и выполнять расширенный ряд операций по ускорению передачи массивов данных из модулей регистрации.

10. Разработку алгоритмов ускоренной передачи информации из групп регистров. Анализ и теоретическое обоснование методов, направленных на значительное уменьшение (в несколько раз) мертвого времени экспериментальных установок при приеме информации о событии за счет ускорения передачи экспериментальных данных и сжатия информационно-избыточных данных.
11. Проведение анализа многопроцессорных систем, ориентированных на параллельную обработку событий. Разработку варианта системы параллельной обработки экспериментальных данных на основе одноплатных процессоров в стандарте VME. Создание прототипа системы параллельной обработки данных, состоящего из трех процессоров, и исследование его работы при выполнении типичных задач обработки данных, полученных со спектрометров элементарных частиц в ФВЭ.

Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, докладывались на международных симпозиумах по ядерной электронике в Будапеште (1973), Дубне (1975 и 1985), Братиславе (1983), Варшаве (1990 и 1992), Варне (1994 и 1997), на совещании по программированию и математическим методам решения физических задач в Дубне (1973), на всесоюзном совещании по автоматизации научных исследований в ядерной физике в Киеве (1976), на международном симпозиуме "Electronic Instrumentation in Physics" в Дубне (1991), на международных конференциях "OPEN BUS SYSTEMS'92 in Research and Industry" в Цюрихе (1992) и "REAL TIME DATA 1994 with emphasis on DISTRIBUTED FRONT-END PROCESSING" в Дубне (1994), на международном совещании "Релятивистская ядерная физика: от сотен МэВ до ТэВ", в Варне (1998). Материалы диссертации отражены в 49 печатных работах [1-49] в виде препринтов и сообщений ОИЯИ, статей в сборниках "Краткие сообщения ОИЯИ", "Физика элементарных частиц и атомного ядра", журналах ПТЭ, CAMAC Bulletin, Нуклеоника, IEEE Trans. on Nucl. Science, Nuclear Instruments and Methods, Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, а также в сборниках трудов совещаний, симпозиумов и конференций.

Структура диссертации отвечает избранной теме. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 173 страницы текста, 90 рисунков, 7 таблиц и список цитируемой литературы из 146 наименований.

Во введении дается краткая характеристика основных факторов, обуславливающих совершенствование технических средств сбора данных для экспериментальных физических установок, предназначенных для проведения исследований в области физики частиц высоких энергий и релятивистской ядерной физики. Определены цели исследований, направленных на развитие и совершенствование методов построения систем сбора данных. Показана актуальность, научная новизна и значимость разработки и создания аппаратных и программных средств, обеспечивших построение систем автоматизации и сбора данных для ряда уникальных экспериментальных физических установок, а также ряда систем и стендов базовых установок Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Определены практические результаты, явившиеся следствием организации многоканальных многопроцессорных систем сбора данных реального времени для экспериментальных установок, предназначенных для работы на ускорителях заряженных частиц. Сформулированы основные положения, выносимые автором диссертации на защиту.

Первая глава диссертации посвящена подробному рассмотрению характеристик экспериментов, проводимых в ФВЭ и РЯФ [1, 2, 3]. Основной задачей ССД является регистрация максимально возможного количества полезных событий. В самом общем случае экспериментальную установку можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 1.

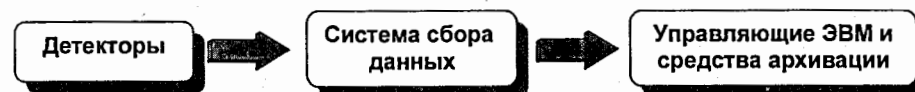


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки.

Из опыта построения ССД следует, что эффективность работы всей системы во многом зависит от методов ее организации. Сформулированы принципы организации ССД. Организационную основу ССД составляют элементы связи, интерфейсы, а также процессоры и ЭВМ. Показано, что развитие средств

построения многоканальных ССД на протяжении последних 30 лет шло от создания однопроцессорных к многопроцессорным системам.

Сформулирован ряд методических задач, которые необходимо решать при построении однопроцессорных ССД. Среди них можно выделить объединение в единую систему аппаратуры регистрации, расположенной в нескольких крейтах САМАС [4], и создание интерфейсов связи с каналом ввода-вывода ЭВМ, управляющей сбором данных. Приведены примеры архитектурного построения основных типов ССД, решающих эти задачи.

Обоснован переход к построению многопроцессорных ССД централизованного типа, которые позволяли бы, во-первых, подключать к ЭВМ более одной стандартной ветви САМАС (7 крейтов), во-вторых, осуществлять достаточно простой переход с одного типа управляющей ЭВМ на другой и, в-третьих, обеспечивать введение в систему нескольких источников управления. Таким средством стал «системный крейт» САМАС. Он обеспечил создание многопроцессорных ССД, что позволило в значительной степени повысить качество экспериментов, осуществляя в реальном времени предобработку и сжатие данных, фильтрацию событий, калибровку и контроль регистрирующей аппаратуры. Так как все элементы управления «системного крейта» сосредоточены на одном уровне, то система остается централизованной. Затем рассмотрены следующие этапы развития многоканальных многопроцессорных ССД. Это переход к древовидной структуре, которая вначале имела структуру иерархического типа. Дальнейшее развитие технологии определило создание ССД, в которых модули объединены в сеть.

Далее рассматриваются основные средства, используемые для построения ССД. Приведено краткое описание стандартов, определяющих построение магистрально-модульных систем VME, FASTBUS и других. Показано, что они позволяют в значительной степени увеличить число каналов регистрации, делают естественным создание структуры ССД с разделением потоков данных по детекторам, упрощают процедуру обработки на всех этапах передачи информации, обеспечивают регистрацию событий с объемом информации до нескольких сотен килобайт. Дано описание высокоскоростных систем SCI, Fiber Channel, HIPPI, ATM, которые обеспечивают передачу больших потоков данных

с оперативным переключением этих потоков с многих каналов регистрации на множество процессоров обработки.

Существенное влияние на архитектуру ССД оказало появление микропроцессоров и выполненных на их основе высокопроизводительных одноплатных ЭВМ [5]. Они обеспечили возможность образования локальных подсистем регистрации по группам детекторов, в каждой из которых происходит сжатие, упаковка и первичная обработка данных аппаратными процессорами, и организации многоуровневого отбора событий. С их помощью организуются автоматизированные измерения параллельно по нескольким каналам регистрации, управление экспериментом, достаточно простое подключение нестандартного оборудования, быстрый отклик на сигналы ускорителя, установки и оператора, а также работа в реальном масштабе времени. Одним из наиболее примечательных применений процессоров в составе ССД являются процессорные фермы (ПФ), предназначенные для выполнения параллельных вычислений и организации окончательного отбора событий.

Далее приведены примеры построения многопроцессорных ССД экспериментальных установок, которые предназначены для проведения экспериментальных исследований на ускорителях на встречных пучках. Архитектура этих ССД отражает наиболее передовые направления и тенденции в развитии методики построения многоканальных многопроцессорных систем реального времени. Рассматриваемые установки содержат очень большое количество каналов регистрации и контроля, а также предъявляют предельные требования к техническим характеристикам электронной аппаратуры, к пропускной способности линий связи и производительности процессорных элементов. Продемонстрирован новый этап в развитии архитектуры ССД на примерах создания экспериментальных установок для ускорителей LEP ЦЕРН и Тэватрон в лаборатории им. Ферми, США. Это организация многоуровневых систем отбора событий и параллельного считывания данных с отдельных детекторных подсистем установок. Основная часть аппаратуры ССД выполнена в стандартах САМАС, FASTBUS и VME, что обеспечивает решение проблем вместимости, организации коммуникаций и распределения процессоров. Для многоцелевых экспериментальных установок на ускорителе HERA (Гамбург) характерно разделение информации о событии на фрагменты и введение конвейерной обработки

фрагментов события. Каждый из фрагментов проходит обработку в сети процессорных устройств, число которых может не совпадать с числом деления события на фрагменты. При этом выполняются операции сжатия, форматирования, вычитания пьедесталов, учёта калибровочных величин и т. п. В ССД этих установок используются такие специальные аппаратные средства, как процессорные модули, многоходовые ЗУ и коммуникации для сверхбыстрой передачи больших массивов данных, а также быстродействующие переключатели потоков многозарядных данных с n входов на m выходов.

Наиболее передовые идеи закладываются при организации ССД установок для проведения исследований на строящихся ускорителях LHC ЦЕРН и RHIC Брукхевен. На эти ССД будет поступать до 10^9 событий/с, что при 10^7 каналов регистрации приводит к необходимости переработки около 10^{15} байт/с первичной информации. При организации этих ССД используются практически все упомянутые выше методические принципы. Совершенствование ССД планируется проводить за счет использования более высокопроизводительных процессоров и организации быстродействующих коммуникаций. Для организации отбора событий 3-го и более высоких уровней, а также доступа экспериментаторов к принимаемой информации с многочисленных рабочих процессорных станций предполагается использовать фермы процессоров, объединенных в сеть.

В заключительной части главы сформулированы наиболее существенные методические решения, касающиеся организации современных систем сбора данных.

Во второй главе рассматриваются средства организации многоканальных систем сбора данных с централизованным управлением, разработанные автором диссертации. Определены основные принципы построения ССД: (1) организация ССД в виде единой информационной системы на основе создания информационных каналов между цифровыми модулями системы и каналами ввода - вывода ЭВМ; (2) обеспечение условий для приема максимально возможного количества событий об изучаемых в эксперименте процессах; (3) создание средств синхронизации процесса сбора данных по сигналам ускорителя, управляющих процессоров, подсистем отбора событий и по командам оператора; (4) организация средств контроля за ходом эксперимента в реальном масштабе

времени. Далее рассмотрены аппаратные и программные средства построения первой в СССР и странах-участницах ОИЯИ системы сбора данных на линии с

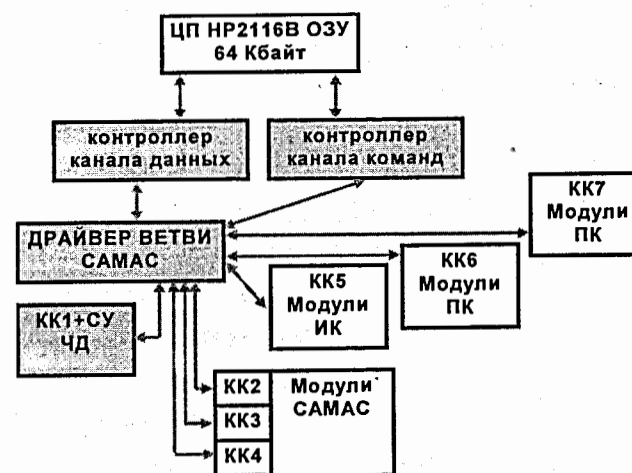


Рис. 2. Блок-схема системы сбора данных установки ФОТОН.

Разработка специализированного драйвера ветви САМАС [8] обеспечила создание ССД в виде единой информационной системы и позволила включить в ее состав мини-ЭВМ. Адресные возможности ССД более чем в 40 раз превысили возможности канала ввода-вывода мини-ЭВМ. При этом скорость передачи данных из любой ячейки адресного пространства ССД поддерживается на уровне максимального быстродействия каналов ввода-вывода мини-ЭВМ (около 0,7 Мбайт/с). Разработан комплекс специализированных программных и аппаратных средств, ориентированных на максимальное использование быстродействия каналов ввода-вывода мини-ЭВМ. Особое внимание уделено решению проблем минимизации времени считывания данных о событии. Показаны средства организации передачи основного массива данных о событии (до 90%) по каналам прямого доступа в ОЗУ ЭВМ [9]. Приведены примеры аппаратной реализации сложных алгоритмов чтения данных из модулей САМАС в ЭВМ. Рассмотрены вопросы синхронизации этих алгоритмов с работой основной программы приема данных. Подробно анализируются созданные для ОС реально-

малой ЭВМ [6, 7]. Эта система обеспечила проведение исследований радиационных распадов резонансов на установке ФОТОН. Основные методические принципы построения этой ССД явились основой создания ССД для последующих экспериментальных установок ЛВЭ. На рис. 2 приведена блок-схема этой ССД.

го времени программные драйверы, которые минимизируют время, необходимое для обработки прерываний и ввода информации по программному каналу [10]. Проверка правильности принятой информации, проводимая в программных драйверах, позволяет уменьшить мертвое время установки на несколько миллисекунд при сбоях в приеме события.

Рассмотрены специальные схемные решения по синхронизации работы установки с сигналами систем быстрого отбора событий, процессом ускорения частиц и командами оператора, что обеспечивает функционирование ССД в реальном масштабе времени [11]. Приведено описание разработанных автором программно-аппаратных средств по введению в состав ССД графической станции и организации оперативного наблюдения за ходом набора экспериментальных данных [12, 13].

Проведение экспериментальных исследований на установке ФОТОН позволило измерить дифференциальные сечения реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 p$, $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ для пионов с импульсом 3,3 ГэВ/с [14].

Рассмотрены также примеры использования этой ССД для проведения испытаний цифрового измерителя временных интервалов с пикосекундным разрешением [15], а также для измерений выхода остаточных ядер-продуктов при взаимодействии частиц и ядер (спектрометр ГАММА)*.

Далее в главе рассматриваются вопросы совершенствования методики построения многоканальных ССД с учетом новых технических решений, появившихся в стандарте САМАС. Описана разработка высоконадежного и экономически целесообразного устройства для широкого круга лабораторных применений, связанных с организацией многоканальных однопроцессорных информационных систем на линии с микроЭВМ с шиной Qbus [16]. Создание драйвера ветви (ДВ) САМАС (см. рис. 3), специализированного для микроЭВМ, обеспечило унифицированный подход к организации многоканальных ССД. ДВ образует информационное пространство ССД на основе стандартной ветви

САМАС (7 крейтов). ДВ обеспечивает двунаправленную передачу данных со скоростью до 1,2 Мбайт/с по каналу прямого доступа в память микроЭВМ. Он обслуживает сигналы прерывания от ускорителя, систем отбора событий и оператора. ДВ позволяет в 10 – 25 раз сократить время, затрачиваемое на прием информации о событии, за счет использования встроенных автоматов (аппаратных процессоров, работающих по фиксированной программе) для трех типов блочной передачи данных. Для обоснования эффективности использования встроенных автоматов автор провел подробный анализ времени передачи данных для всех типов блочной передачи, определенных стандартом САМАС [17].

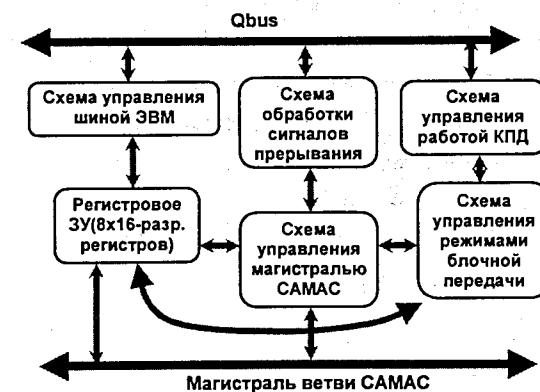


Рис. 3. Блок-схема драйвера ветви САМАС для микроЭВМ.

Для оценки эффективности использования режимов блочных передач

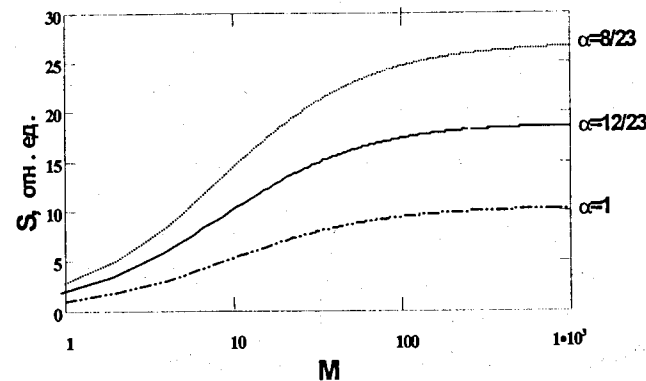


Рис. 4. График зависимости ускорения времени сбора данных для режима ASM (M - число регистров в системе, число регистров в каждом модуле равно восьми, α - коэффициент заполнения крейта).

данных введена величина S , определяющая ускорение времени сбора данных по сравнению с режимом, в котором передача каждого слова данных программируется. На рис. 4 приведен график изменения S для одного из режимов стандартной блочной передачи данных ASM

* Бутцев В.С., ..., Смирнов В.А. и др. Сообщение ОИЯИ Р1-85-438, Дубна, 1985.

(сканирование по адресам САМАС). Использование этого режима позволяет на аппаратном уровне осуществлять сжатие информации о событии за счет удаления ничего не значащих нулевых данных.

Далее рассмотрены предложенные автором новые нестандартные возможности ускорения чтения данных из регистров САМАС и расширения информационного пространства ССД [18, 19].

В модулях с большим количеством регистров целесообразно опрашивать не все регистры, что происходит в режиме *ASM*, а только те, в которых есть данные (метод "плавающих субадресов"). Предлагается также способ расширения информационного пространства модуля САМАС до 360 регистров (метод регистровых групп) и соответствующий такому расширению тип блочной передачи данных. На рис. 5 приведены графики ускорения *S* блочной передачи данных в режиме сканирования адресов для режима *ASM* и двух вышеупомянутых авторских типов блочной

передачи в зависимости от полного числа регистров в системе *M*. Сравнение графиков показывает, что при равных условиях наибольшее ускорение времени сбора данных о событии

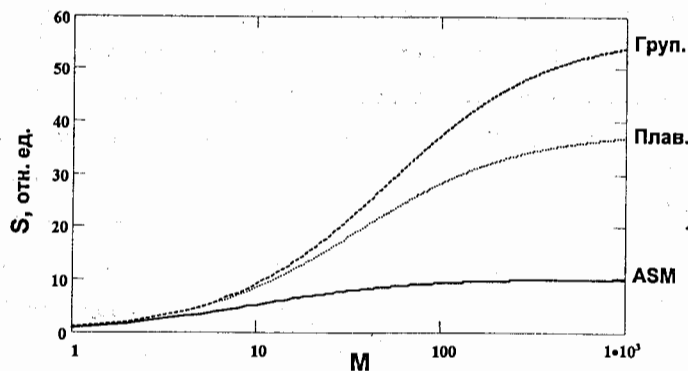


Рис. 5. Графики зависимости ускорения времени сбора данных при чтении информации о событии для трех типов блочной передачи.

может быть получено при передаче данных из модулей с группами регистров, потом при использовании метода "плавающих субадресов" и лишь затем методом *ASM*.

В заключительной части главы рассмотрены основные примеры использования ДВ в ЛВЭ. Даны описания созданных с участием автора ССД экспериментальной установки ГИБС [20, 21] (см. рис. 6) и переднего детектора спектрометра

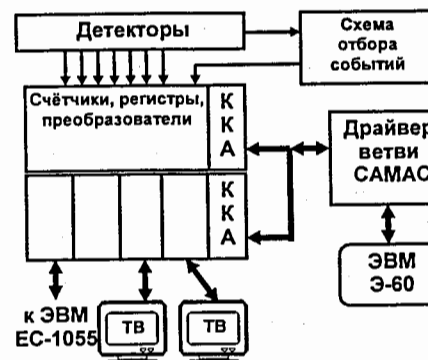
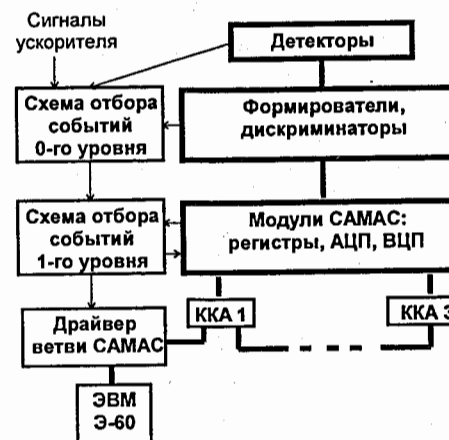


Рис. 6. Блок-схема автоматизированной системы контроля триггера в установке ГИБС.

СФЕРА (см. рис. 7) [22]. Приведены также описания стендов по контролю и управлению работой криогенного источника поляризованных дейтронов ПОЛЯРИС* и по измерению температуры сверхпроводящего модельного синхротрона СПИН**, автоматизированных при помощи ДВ.

Рис. 7. Блок-схема ССД переднего детектора установки СФЕРА на первом этапе ее создания.



Третья глава посвящена вопросам развития средств организации многоканальных ССД за счет введения в их состав элементов многопроцессорного управления и значительного расширения их информационного пространства.

В середине 70-х годов решение этой проблемы было обеспечено авторской разработкой системного крейта САМАС (СКК) [23, 24]. Разработка СКК обеспечила создание систем сбора данных, ориентированных на работу в реальном масштабе времени, практически для всех экспериментальных установок, создаваемых в ЛВЭ с 1975 по 1985 годы. Дано подробное описание СКК.

* Жигулин И.В., Шутов В.Б. Препринт ОИЯИ Р11-88-608, Дубна, 1988.

** Ефимов Л.Г., ..., Смирнов В.А. - В кн.: Труды десятого всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 21-23 октября 1986, Дубна. Том 1, Д9-87-105. Дубна: ОИЯИ, 1987, с. 100.

Он обеспечивает объединение в рамках ССД до $3 \cdot 10^4$ каналов регистрации и управления, что на порядок больше возможностей стандартной ветви САМАС [25]. СКК позволяет ввести в состав системы средства для сжатия, фильтрации и переформатирования принимаемой информации, а также дополнительные процессоры для контроля и графического представления экспериментальных данных [26] (см. рис. 8). ССД на основе СКК независима от типа управляющей ЭВМ. СКК обеспечивает режимы групповой передачи данных, что позволяет добиваться значительного снижения мертвого времени установки при приеме данных на событие.

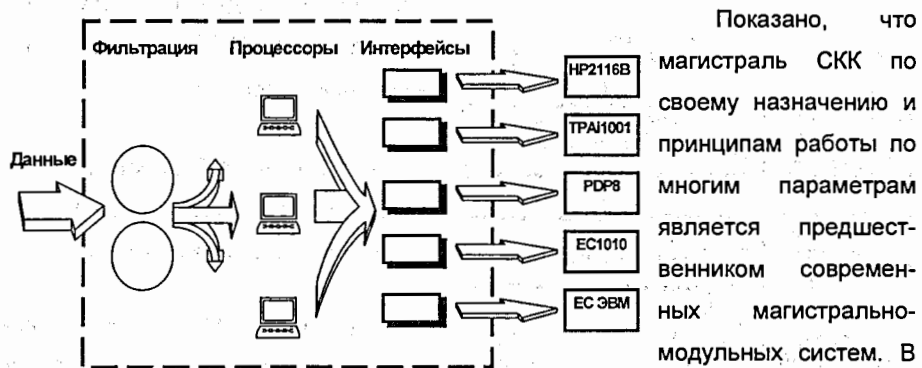


Рис. 8. Преобразование потоков информации в системном крейте САМАС.

Показано, что магистраль СКК по своему назначению и принципам работы по многим параметрам является предшественником современных магистрально-модульных систем. В

главе детально рассматриваются алгоритмы проведения арбитража запросов от многих источников управления, передач данных и работы с сигналами прерывания. Арбитраж ресурсов магистрали СКК проводится в тех случаях, когда несколько модулей управления одновременно выставляют свои запросы. Для ускорения передачи данных из регистрирующих модулей в управляющие предусмотрен режим групповой передачи блоков данных. Дана характеристика задач, выполняемых ССД в реальном режиме времени, и обосновывается необходимость введения параллельного анализа данных в ССД.

Далее рассмотрено использование СКК в качестве средства архитектурного построения двухуровневой многопроцессорной системы, обеспечившего создание системы контроля и управления параметрами медленного вывода синхрофазотрона ОИЯИ [27, 28]. Основными элементами системы являются две малые ЭВМ и СКК (см. рис. 9). СКК объединяет многочисленные модули, ответ-



Рис. 9. Блок-схема системы автоматизации подсистемы медленного вывода.

ственные за измерение параметров ускорителя, а также за передачу сигналов воздействия на элементы системы вывода и информации оператору. СКК организует управление системой от трех источников команд: интерфейса ЭВМ ЕС-1010, аппаратного процессора и блока ручного управления. Интегрирование в систему контроля графической станции потребовало создания двухпроцессорного комплекса, в котором каждый из процессоров участвует на равной основе. Приведено описание разработанных специализированных аппаратных средств по осуществлению двустороннего обмена данными и сигналами прерываний между ЭВМ ЕС-1010 и графической станцией [29].

Подробно рассматриваются вопросы использования СКК для построения ССД и сжатия экспериментальной информации на установках БИС-2 [30] и

АЛЬФА [31]. Организация ССД установки БИС-2 на основе СКК обеспечивает формирование информационного пространства в виде двух стандартных ветвей САМАС (см. рис. 10). Система содержит более 6000 каналов регистрации. Управление процессами сбора экспериментальных данных проводят ЭВМ ЕС1040, ЭВМ ТРА 1000i, аппаратный процессор ПКП и блок ручного управления.

ССД установки АЛЬФА также основана на СКК*. Источниками команд в ССД являются ЭВМ ЕС1010, аппаратный процессор ПКП и блок ручного управления.

В установках БИС-2 и АЛЬФА основной объем первичной информации на событие приходит с пропорциональных камер и определяется количеством каналов регистрации, связанных с ними. Взаимодействия, на исследования которых ориентированы установки БИС-2 и АЛЬФА, характеризуются появлением

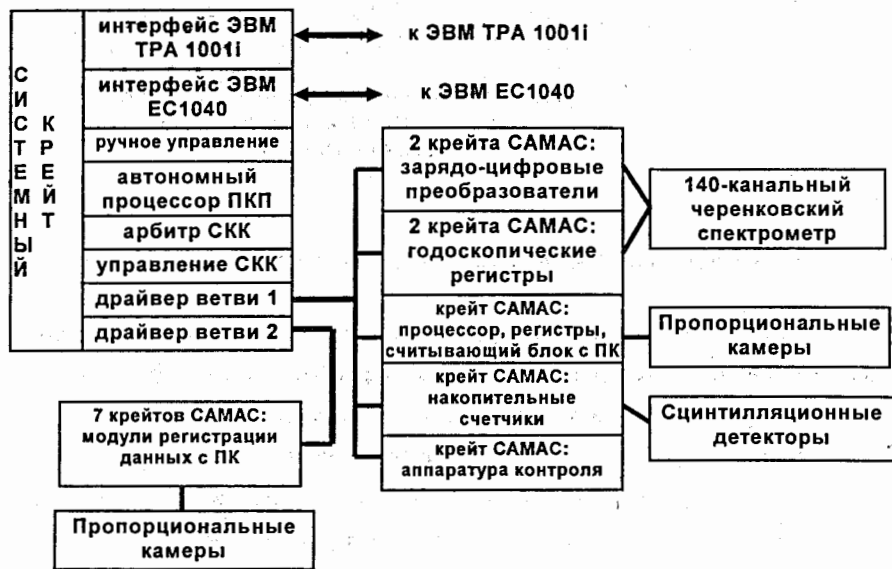


Рис. 10. Блок-схема системы сбора данных экспериментальной установки БИС-2.

* Аблеев В.Г. и др. Сообщение ОИЯИ 10-11124, Дубна, 1977.

сигналов лишь в небольшом числе каналов регистрации (менее 10%). При этом среди передаваемых слов данных много нулевых.

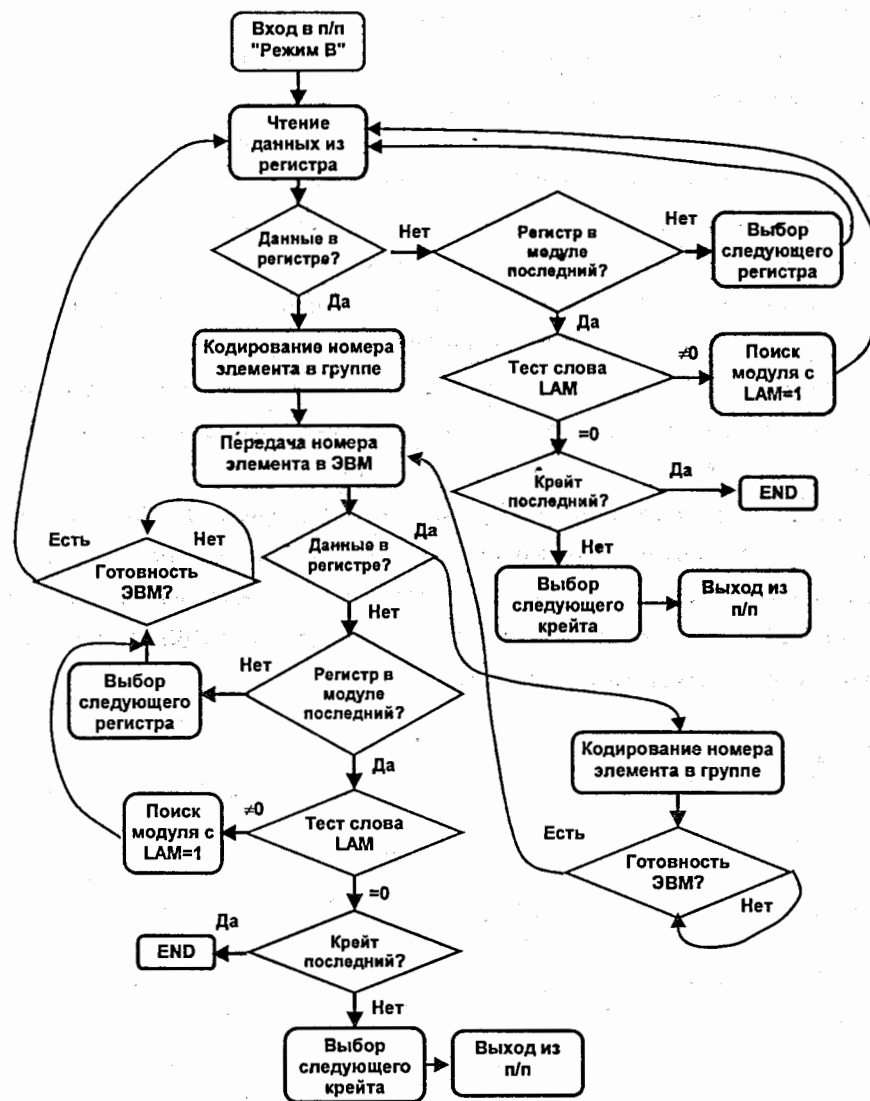


Рис. 11. Алгоритм работы ПКП "Режим В" при определении номеров ячеек годоскопа и передаче информации в ЭВМ.

Использование специализированного аппаратного процессора ПКП позволяет сжимать информацию, уменьшая длину события более чем в 10 раз [32, 33]. Кроме того, аппаратный процессор ПКП способен вычислять адрес ячейки годоскопа, в которой был зарегистрирован сигнал. В диссертации дан подробный анализ алгоритмов работы аппаратного процессора для всех его режимов. На рис. 11 приведен алгоритм работы ПКП по определению модуля с ненулевой информацией, номера ячейки годоскопа и по передаче данных в ЭВМ.

Приведены аналитические выражения, определяющие затраты времени на передачу информации в ЭВМ для этих режимов. В режиме А осуществляется последовательное чтение и передача в управляющий процессор данных со всех N модулей регистрации годоскопической системы. В режиме Б производится чтение и передача в управляющий процессор только ненулевых данных. В режиме В проводится определение номеров ячеек годоскопа и передача этой информации в ЭВМ.

На рис. 12 приведены графики времени передачи данных в ЭВМ в зависимости от числа ячеек годоскопической системы для трех режимов передачи. Показано, что чтение данных только из регистров с ненулевой информацией в значительной степени уменьшает время передачи данных в ЭВМ, а, следовательно, и мертвое время ССД на прием события.

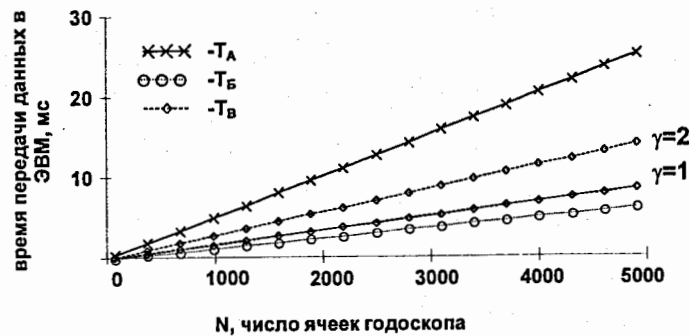


Рис. 12. Графики времени передачи данных в ЭВМ для трех режимов: T_A – в режиме А; T_B – в режиме Б; T_B – в режиме В для случаев, когда в регистре установлены один ($\gamma=1$) или два ($\gamma=2$) разряда.

Показано влияние параметра β , который определяет долю регистров, содержащих ненулевые данные, к общему количеству всех регистров (см. рис. 13). При этом фиксируется значение числа ячеек годоскопа $N = 5000$. Из графика видно, что чтение ненулевых данных без определения номера ячейки имеет смысл лишь при значениях параметра $\beta < 0,4$.



Рис. 13. Графическое представление времени передачи годоскопических данных в ЭВМ в зависимости от параметра β для режимов: T_B и T_B . Время T_A не зависит от β и приведено для сравнения.

Далее в диссертации рассматриваются примеры использования СКК для построения систем сбора данных для экспериментальных установок ЛВЭ: СЯО, ДИСК и Кристалл [34, 35]. СКК обеспечивает организацию управления сбором данных от ЭВМ типа ЕС, которая располагалась от установки на расстоянии около 1 км. На рис. 14 приведено схематичное изображение ССД этих установок. Использование СКК обеспечило создание ССД установок и, соответственно, работу этих установок на пучке ускорителя и набор экспериментальных данных в кратчайшие сроки.

В заключительной части главы показано, что в дальнейшем СКК обеспечил очень простую адаптацию ССД установки КРИСТАЛЛ для организации сбора данных с прототипа адронного калориметра установки ДЕЛФИ*.

* Гузик З., Рыжов В.Н., Цыганов Э.Н. Сообщение ОИЯИ Р13-85-530, Дубна, 1985.

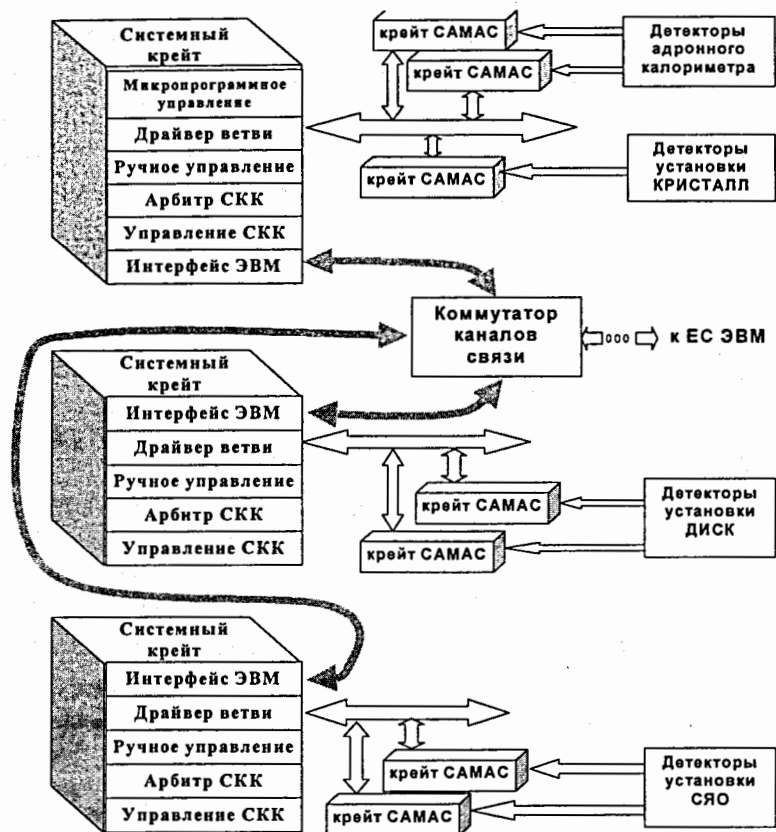


Рис. 14. Изображение комплекса установок ЛВЭ, работающих на линии с ЭВМ типа ЕС с использованием системного крейта

Четвертая глава диссертации посвящена разработкам средств организации многоканальных многопроцессорных ССД на основе магистрально-модульной шины VME. Аппаратура в стандарте VME в значительной степени расширяет возможности экспериментатора по организации ССД. Шина VME обеспечивает, во-первых, более высокую пропускную способность данных (до 20 Мбайт/с), во-вторых, адресацию к памяти до 16 Мбайт при 24-разрядной адресации и до 4 Гбайт при 32-разрядной адресации. Эти особенности, а также гибкий механизм передачи управления от модуля к модулю с малыми временными затратами на арбитраж запросов шины позволяют реализовывать про-

цессы фильтрации, сжатия и предобработки данных в реальном масштабе времени и с высокой эффективностью.

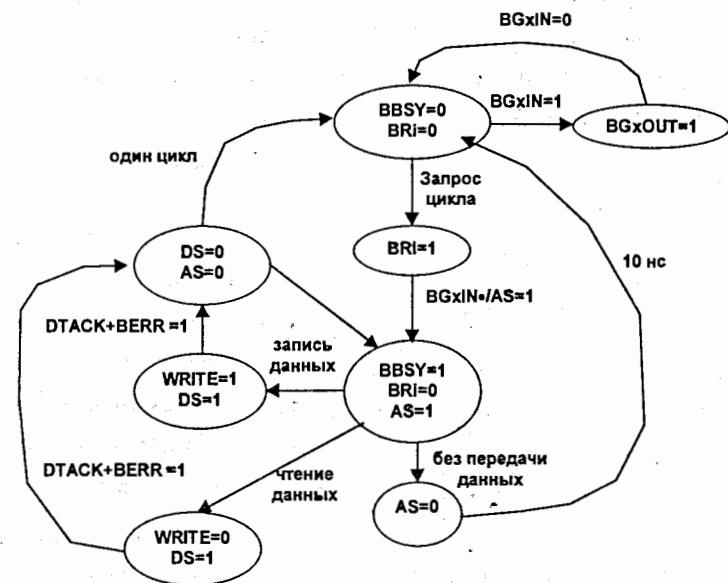


Рис. 15. Граф состояний устройства сопряжения при организации взаимодействия процессора с устройствами ССД ($BGxIN$, $BGxOUT$, BRI , $BBSY$, AS , DS , $WRITE$, $DTACK$, $BERR$ – сигналы шины VME).

Предложен новый способ организации ССД, который основан на использовании центрального крейта VME и направлен на обеспечение одновременной работы нескольких процессорных устройств [36, 37, 38]. Внедрение этой методики в конце 80-х годов в практику физического эксперимента ЛВЭ потребовало разработки ряда аппаратных средств в стандарте VME. Далее приведены описания системного контроллера и устройства сопряжения с шиной Qbus. Системный контроллер организует многопроцессорную работу и оптимальное использование ресурсов шины VME [39]. Одно или несколько устройств сопряжения шины VME с шиной Qbus обеспечивают присоединение к системе соответствующего числа процессорных устройств. Каждый процессор может быть использован в качестве элемента управления ресурсами ССД [40]. На рис. 15 приведен граф состояний модуля при организации взаимодействия процессора с устройствами ССД.

Дано описание первого опыта использования вышеупомянутых модулей VME для создания многопроцессорного варианта подсистемы управления циклом сверхпроводящего синхротрона [41] (см. рис. 16). Эффективное разделение задач между двумя процессорами позволило значительно сократить время, необходимое для изменения режимов работы подсистемы управления (почти в 300 раз).

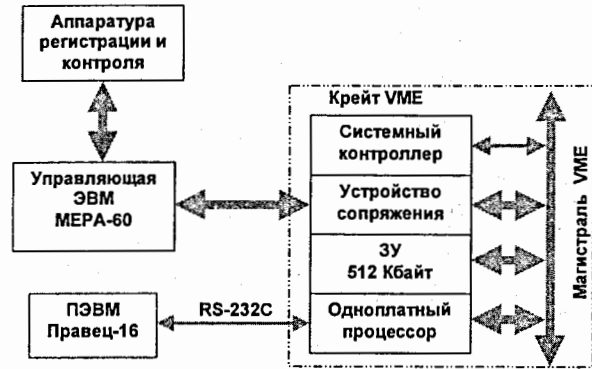


Рис. 16. Структурная схема многопроцессорного варианта подсистемы управления циклом сверхпроводящего синхротрона.

Далее приведено описание устройства, предназначенного для объединения аппаратуры в стандартах VME и SAMAC. Это - микропрограммный драйвер ветви (МДВ) SAMAC в стандарте VME [42]. Он построен на основе специализированного процессора и позволяет подключить к шине VME от одной до восьми стандартных ветвей SAMAC.

В архитектуру МДВ заложен модульный принцип. В состав МДВ входят один интерфейс магистрали VME (ИМ) и один или несколько однотипных модулей микропрограммного управления (МУ), каждый из которых выполнен в виде модуля SAMAC и обеспечивает сопряжение с одной ветвью SAMAC (см. рис. 17). Каждый модуль управления

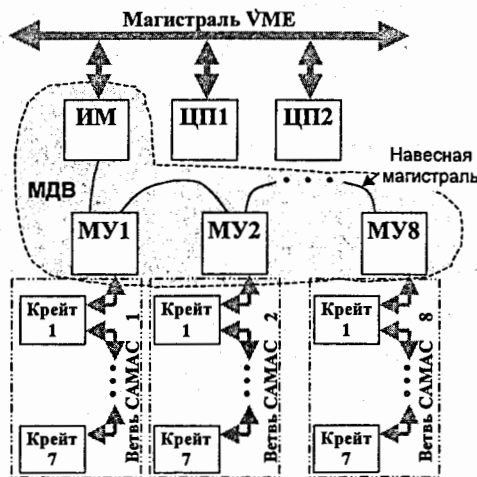


Рис. 17. Общая структура средства сопряжения шины VME и аппаратуры SAMAC.

работает по своей индивидуальной программе. МДВ обеспечивает выполнение расширенного ряда операций передачи данных по магистрали SAMAC. Разработаны алгоритмы для 10 типов такого рода групповых операций. Основные сигналы управления МДВ и синхронизация обмена с ветвью SAMAC запрограммированы. Все микропрограммы написаны на языке МИКРОАССЕМБЛЕР (МА), который был специально разработан для микропрограммного обеспечения МДВ.

Рассмотренные выше модули VME явились основой для построения ССД установки СФЕРА на одном из этапов ее создания [43, 44, 45]. Основой построения ССД является центральный крейт VME (см. рис. 18). В ССД также

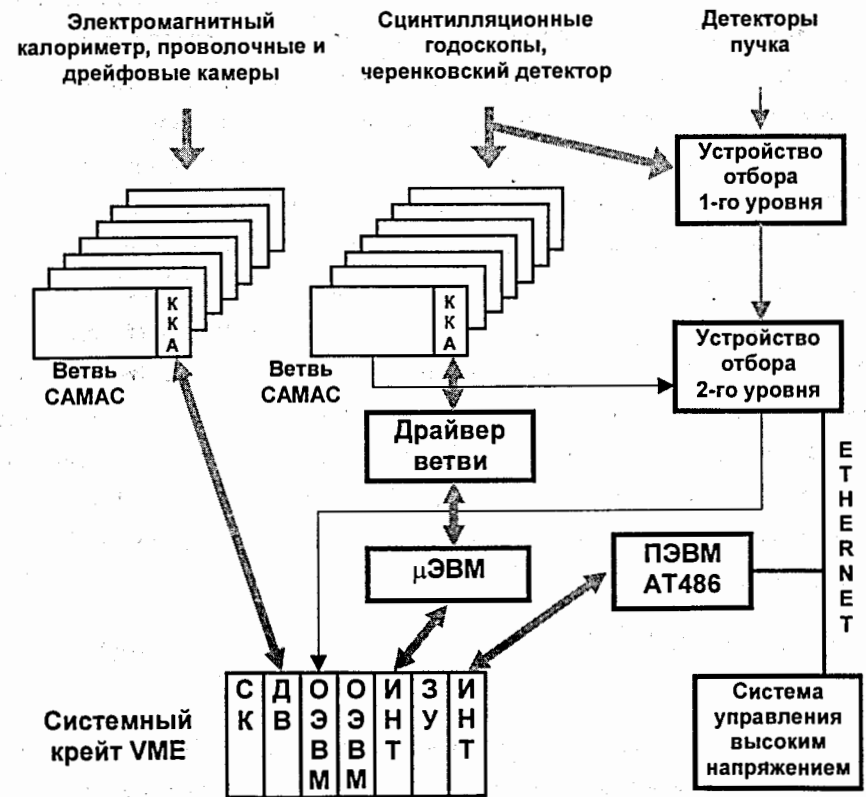


Рис. 18. Блок-схема ССД установки СФЕРА.

входят системный контроллер крейта VME (СК); драйвер ветви САМАС (ДВ), управляемый одноплатной ЭВМ со встроенным микропроцессором MC68020 (ОЭВМ); интерфейс (ИНТ1) с микроЭВМ, буферное ЗУ; интерфейс (ИНТ2) с ПЭВМ типа IBM. ПЭВМ управляет работой системы, преобразует часть принимаемых данных и представляет их в графическом виде, а также отправляет всю информацию о событии в архив на хранение.

Пятая глава диссертации посвящена рассмотрению вопросов организации, аналитического анализа и разработки параллельных многопроцессорных структур, которые в последние годы широко используются как в составе систем сбора данных, так и в виде автономных систем. Показано, что введение в практику физического эксперимента систем отбора событий, выполняющих сложные алгоритмы по практически полной реконструкции события, явилось предпосылкой для организации параллельной обработки данных. То обстоятельство, что события, регистрируемые спектрометрами, статистически независимы, позволяет организовать их параллельную обработку набором процессоров. При этом события во всех процессорах обрабатываются по одному и тому же алгоритму.

В работе предложен единый подход к проблеме анализа многопроцессорных систем параллельной обработки информации. Обработка проводится на системе, состоящей из N процессоров. Задача разбивается на M элементов - подзадач, которые могут обрабатываться параллельно. Затраты R определяют время выполнения одной задачи в единичном процессоре. Величина C определяет дополнительное время, затрачиваемое на организацию взаимодействия (планирование, распределение ресурсов, обмен данными, синхронизация) двух подзадач. При постоянных R и C полное время обработки M элементов задачи определяет соотношение:

$$T_{\text{вс}} = R \cdot \max(k_i) + \frac{C}{2} \cdot \sum_i k_i \cdot (M - k_i) = R \cdot \max(k_i) + \frac{C}{2} \cdot (M^2 - \sum_i k_i^2),$$

где k_i - число элементов, выполняемых на i -ом процессоре. Для оценки эффективности работы многопроцессорной системы параллельной обработки по сравнению с одним процессором вводится величина, характеризующая ускорение вычислений S .

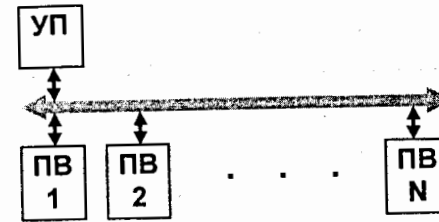
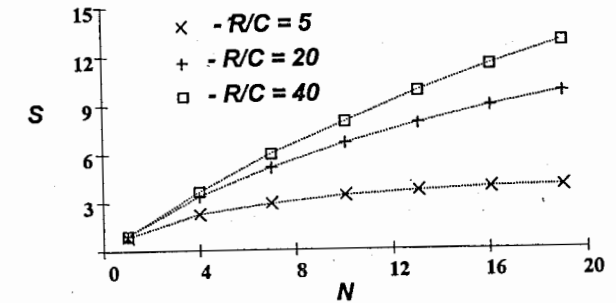


Рис. 19. Структурная схема процессорной фермы (УП – управляющий процессор, ПВ – процессор-вычислитель).

Для решения задач, связанных с параллельной обработкой событий, используются вычислительные системы, состоящие из набора однотипных процессорных устройств, и получившие название процессорных ферм ПФ [46] (см. рис. 19). В работе проанализированы условия, необходимые для эффективного проведения параллельной обработки событий, даны оценки по выбору оптимального числа процессоров, работающих параллельно [47, 48]. На рис. 20 приведены зависимости ускорения вычислений от числа процессоров, работающих в параллель.

Рис. 20. Зависимости величин ускорения вычислений от числа процессоров, работающих в параллель, для трех различных значений R/C .



Проведен анализ [47] эффективности использования одной из первых многопроцессорных систем, которая состоит из нескольких микроЭВМ 168/E* и предназначена для анализа экспериментальной информации методами ее параллельной обработки. Для оценки эффективности параллельной обработки событий использована безразмерная величина ускорения вычислений S .

$$S = \frac{R/b}{(R+nt)/N+C}, \text{ где } R - \text{ время, затрачиваемое на анализ одного события в микроЭВМ; } C - \text{ время, затрачиваемое на организацию взаимодействия управляющей ЭВМ типа IBM-370 с ЗУ данных микро-}$$

* Kunz P.F. et al. - IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-26, p. 582.

ЭВМ; параметр b определяет, во сколько раз быстрее выполняется задача в ИВМ, чем в микроЭВМ; n – параметр ветвления программы обработки для микроЭВМ; t – время записи ветви программы. На рис. 21 приведены графические зависимости величины ускорения для трех различных значений $R = 1$ с, 400 мс, 100 мс, для значений $n = 0$ и 10 , для $C = 30$ мс, для $b = 2$ и $t = 10$ мс.

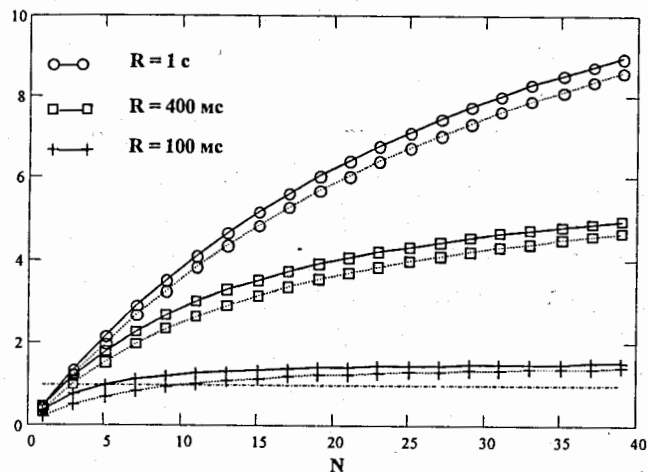


Рис. 21. Графики ускорения обработки событий набором 168/Е. Сплошными линиями показаны графики для программ обработки без ветвления программы ($n = 0$), а пунктирными - с ветвлением ($n = 10$).

ны вопросы создания на базе магистрали VME многопроцессорной вычислительной системы (модульного суперкомпьютера) с производительностью, которая равна суммарной производительности десятков высокопроизводительных ЭВМ при выполнении типичных задач обработки данных, полученных со спектрометров элементарных частиц в ФВЭ [48]. Был проведен анализ требований, которые предъявлялись в ЛВЭ к обработке экспериментальной информации в период 1986-90 гг. Для проведения необходимых расчетов в качестве основного процессора VME была выбрана одноплатная ЭВМ производительностью 1 Моп./с.

В таблице приведены расчетные значения производительности суперкомпьютера при обработке событий со спектрометров БИС-2 и ДЕЛФИ. Проведен

Из приведенных зависимостей видно, что ускорение вычислений становится больше единицы при разном количестве параллельных процессоров в зависимости от времени, необходимого для анализа одного события.

Далее в главе рассмотре-

расчет ускорения времени анализа событий в зависимости от числа параллельных процессоров в суперкомпьютере (см. рис.22).

Наименование спектрометра	Объем события, Кбайт	Затраты R на обработку события в ПВ, с	Затраты C на коммуникацию ПВ с УП на событие, мс	R/C
БИС-2	1,0	1,0	0,06	$1,7 \cdot 10^4$
ДЕЛФИ	1200	215,0	70,0	$3,1 \cdot 10^3$

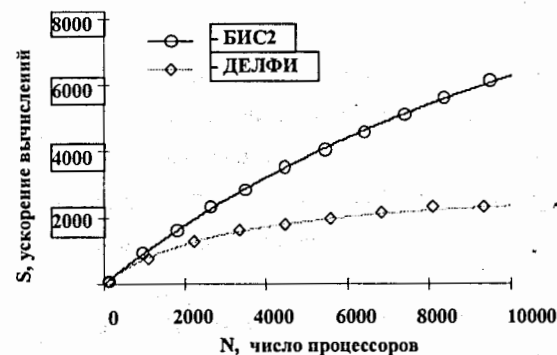


Рис. 22. Графики ускорения времени анализа события в суперкомпьютере от числа процессорных элементов.

Последняя часть главы посвящена описанию работ по проверке целесообразности выполнения параллельной обработки событий. Был создан прототип многопроцессорной системы (см. рис. 23) [49]. При помощи этого прототипа был проведен цикл испытаний.

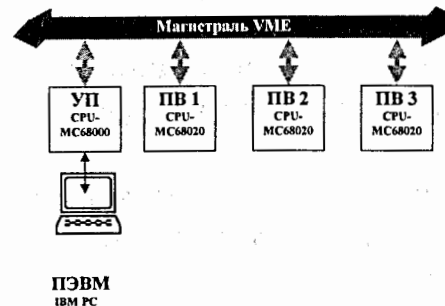


Рис. 23. Блок-схема прототипа многопроцессорной вычислительной системы.

На рис. 24 приведены графики измеренных и вычисленных теоретически величин ускорения обработки событий. Отличия в этих графиках небольшие, что служит доказательством допустимости предположений, положенных в основу расчетов эффективности анализа событий набором параллельных процессоров.

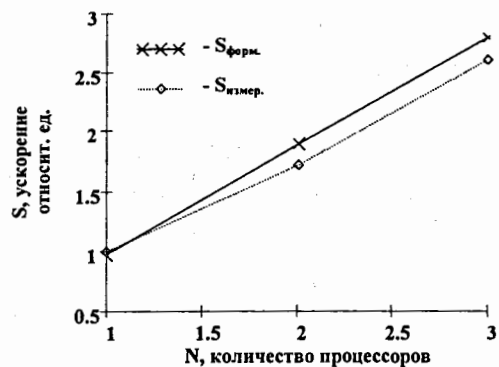


Рис. 24. Графики величин ускорения обработки событий измеренных и вычисленных по формуле.

В заключении диссертации приведены ее основные выводы:

1. Разработан комплекс аппаратных и программных средств, на основе которых в течение 1973 - 1998 годов был создан ряд многоканальных многопроцессорных систем сбора данных реального времени для экспериментальных и базовых установок ЛВЭ ОИЯИ: ФОТОН, Медленный вывод, БИС-2, АЛЬФА, ДИСК-2, СЯО, КРИСТАЛЛ, ГИБС, СФЕРА.
2. Разработано устройство с управлением от многочисленных источников (оригинальный системный крейт САМАС), предназначенное для организации многоканальных информационных систем в стандарте САМАС. Системный крейт послужил основой для создания универсальной многоканальной многопроцессорной системы сбора данных, ориентированной на работу в реальном масштабе времени и предназначенной для экспериментальных установок в области физики высоких энергий и релятивистской ядерной физики. Технические решения, заложенные в конструкцию системного крейта, находятся на мировом уровне и обеспечивают:
 - создание многоканальных информационных систем с использованием до 20 управляющих процессоров и до 10 стандартных ветвей САМАС на основе оригинальной многопроцессорной магистрали;
 - организацию арбитража сигналов запроса от нескольких процессоров на право управления системой в пределах от 20 нс до 200 нс;

- объединение до $3 \cdot 10^4$ каналов регистрации и управления в рамках единой информационной системы САМАС, что более чем на порядок больше возможностей стандартной ветви САМАС;
 - снижение мертвого времени установки при чтении данных о событии более чем в десять раз, что достигается за счет ускоренной передачи информации из групп регистров.
3. На основе системного крейта с 1975 по 1985 гг. созданы система автоматизации измерения и контроля параметров на Синхрофазотроне; системы сбора данных для экспериментальных установок ЛВЭ БИС-2, Альфа, Кристалл, СЯО, ДИСК-2; система автоматизации бустерного синхротрона в ИФВЭ (Протвино).
 4. Создан комплекс аппаратных и программных средств, обеспечивший впервые в странах-участницах ОИЯИ регистрацию экспериментальных данных на линии с малой ЭВМ в реальном масштабе времени. Этот комплекс в течение нескольких лет использовался для проведения исследований радиационных распадов резонансов на установке ФОТОН. На этом комплексе также проводились измерения выходов остаточных ядер-продуктов при взаимодействии частиц и ядер в спектрометре ГАММА. Разработаны методы синхронизации процесса сбора данных по сигналам, поступающим от ускорителя, систем отбора событий и оператора. Эти методы используются в системах сбора данных вплоть до настоящего времени.
 5. Создан многоканальный многопроцессорный информационный комплекс реального времени, явившийся основой для организации системы контроля и управления параметрами медленного вывода пучка частиц Синхрофазотрона.
 6. Разработано устройство для широкого круга лабораторных применений по организации многоканальных однопроцессорных информационных систем, управляемых микроЭВМ с магистралью Qbus. Отличительными чертами этого устройства являются высокая скорость обмена данными (до 1 Мбайт/с) за счет встроенных средств передачи массивов данных, высокая надежность и экономическая целесообразность. На основе этого устройства были созданы системы сбора данных для установки ГИБС, первой очереди

спектрометра СФЕРА и система контроля параметров автоматизированного источника поляризованных дейтронов "Полярис".

7. Создан аппаратный процессор, который в режиме реального времени управляет процессами сжатия информационно-избыточных данных и перекодировки данных с детекторов годоскопического типа. Процессор интегрирован в состав систем сбора данных экспериментальных установок БИС-2 и АЛЬФА и на протяжении нескольких лет обеспечивал проведение исследований на этих установках.
8. При создании спектрометра СФЕРА впервые в странах-участницах ОИЯИ предложен и использован новый способ организации систем сбора данных с использованием магистрально-модульной шины VME. Этот способ обеспечивает управление системой от многочисленных источников, организацию параллельной работы нескольких процессорных устройств и позволяет объединять в рамках единой информационной системы электронную аппаратуру, выполненную в различных стандартах (CAMAC, FASTBAS, VME).
9. Разработан комплекс аппаратуры в стандарте VME (системный контроллер и модуль сопряжения с магистралью Qbus), на основе которого была создана многопроцессорная подсистема управления циклом сверхпроводящего синхротрона СПИН.
10. Разработан микропрограммный драйвер ветви CAMAC в стандарте VME, позволяющий образовывать до восьми стандартных ветвей CAMAC и выполнять расширенный ряд операций по ускорению передачи массивов данных из модулей регистрации спектрометра СФЕРА.
11. Проведены анализ и теоретическое обоснование методов, направленных на значительное уменьшение (в несколько раз) мертвого времени экспериментальных установок при приеме информации о событии за счет ускорения передачи экспериментальных данных и сжатия информационно-избыточных данных.
12. Проведен анализ многопроцессорных систем, ориентированных на параллельную обработку событий. Разработан вариант системы параллельной обработки экспериментальных данных на основе одноплатных процессоров в стандарте VME.

13. Создан прототип системы параллельной обработки данных, состоящий из трех процессоров, и проведено исследование его работы при выполнении типичных задач обработки данных, полученных со спектрометров элементарных частиц в ФВЭ.
14. Получены уникальные физические результаты на установках ЛВЭ, использующих системы сбора данных, созданные автором диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах.

1. Смирнов В.А. Средства организации систем сбора данных для проведения экспериментов в области физики высоких энергий. - ЭЧАЯ, 1997, том 28, вып. 5, с. 1295.
2. Смирнов В.А. Использование "открытых" стандартов электроники для физических исследований. - Краткие сообщения ОИЯИ, 1997, №4(84)-97, с. 71.
3. Смирнов В.А. Современные средства архивации данных в экспериментах ФВЭ. - В кн.: Труды Международного совещания "Релятивистская ядерная физика: от сотен МэВ до ТэВ", Болгария, Варна, 26 - 31 мая 1998г. Дубна: ОИЯИ, 1998, с. 268.
4. Колпаков И.Ф., Смирнов В.А., Хмелевски Е. Современное состояние системы CAMAC (обзор). - ПТЭ, 1975, N 2, с. 24.
5. Смирнов В.А. Возможности использования микропроцессоров в аппаратуре для физических исследований (обзор). - В кн.: Труды VIII Международного симпозиума по ядерной электронике, Дубна, 1975. Дубна: ОИЯИ, 1975, D13-9287, с. 238.
6. Колпаков И.Ф., Никитюк Н.М., Смирнов В.А., Черных Е.В. Многокрейтная система в стандарте КАМАК на линии с ЭВМ HP2116B. - В кн.: Труды VII Международного симпозиума по ядерной электронике, 17-23 сентября 1973, Будапешт. Дубна: ОИЯИ, 1974, D13-7616, с. 163.
7. Chernykh E.V., Kolpakov I.F., Nikityuk N.M., Smirnov V.A. CAMAC Multicrate System on-line to an HP2116B Computer. - CAMAC Bulletin, 1974, № 10, p. 21.
8. Никитюк Н.М., Смирнов В.А., Черных Е.В. Блок для организации ветви в стандарте КАМАК на ЭВМ HP2116B. - Препринт ОИЯИ 10-7914, Дубна, 1974.

9. **Chernenko S.P., ..., Smirnov V.A., Yu.V.Zanevsky.** A CAMAC Seven-Crate System on-line with an HP2116B Computer. - In: Proceedings of the 2-nd ISPPRA Nuclear Electronics Symposium, Stress., Italy, May 20-23, 1975. Luxemburg, 1975, p. 117.
10. **Смирнов В.А., Черных Е.В.** Программные средства сопряжения многокрейтной системы в стандарте КАМАК. - Препринт ОИЯИ 10-8333, Дубна, 1974.
11. **Говорун Н.Н., Иванченко И.Н., Кулаков Б.А., ..., Смирнов В.А. и др.** - В кн.: Труды совещания по программированию и математическим методам решения физических задач, Дубна, 30 окт.- 4 ноября 1973. Дубна: ОИЯИ, 1974, Д10-7707, с. 445.
12. **Смирнов В.А.** Использование дисплея ТЕКТРОНИКС 611 на линии с ЭВМ HP2116B. - ПТЭ, 1976, № 5, с. 83.
13. **Смирнов В.А.** Подключение дисплея ВТ-340 в качестве пульта оператора к ЭВМ HP2116B. - ПТЭ, 1976, № 4, с. 94.
14. **Аствацатуров Р.Г., Архипов В.В., Бойцова Л.С., ..., Смирнов В.А. и др.** Дифференциальное сечение реакций $\pi^+ p \rightarrow n$ при импульсе 3,3 ГэВ/с. - Препринт ОИЯИ 1-10600, Дубна, 1977.
15. **Тлачала В., Басиладзе С.Г., Смирнов В.А.** Цифровой измеритель временных интервалов. - Нуклеоника, 1974, в19, № 9, с. 85.
16. **Смирнов В.А., Хоанг Као Зунг.** Организация ветви КАМАК на линии с ЭВМ LSI-11, "Электроника-60" и МЕРА-60. - Сообщение ОИЯИ 10-81-528, Дубна, 1981.
17. **Смирнов В.А., Хмелевски Е., Черных Е.В.** Блочная передача данных в стандарте КАМАК (обзор). - Препринт ОИЯИ 10-8614, Дубна, 1975.
18. **Смирнов В.А., Хмелевски Е., Черных Е.В.** Чтение регистров с ненулевой информацией в модулях КАМАК в режиме сканирования адреса. - Препринт ОИЯИ 10-8615, Дубна, 1975.
19. **Chernykh E.V., Chmillewsky J., Smirnov V.A.** Faster Address-Scan by Reading only non-Zero Data. - CAMAC Bulletin, 1975, № 13, p. 23.
20. **Базылев С.Н., Смирнов В.А.** Организация системы сбора данных на базе микро-ЭВМ "Электроника-60", работающей на линии с ЕС ЭВМ. - В кн.: Труды

XII Международного симпозиума по ядерной электронике, 2-6 июля 1985, Дубна. Дубна: ОИЯИ, 1985, Д13-85-793, с. 139.

21. **Базылев С.Н., Беликов Ю.А., Голохвастов А.И., ..., Смирнов В.А. и др.** Автоматизированная система контроля триггера установки ГИБС. - Сообщение ОИЯИ P10-90-533, Дубна, 1990.
22. **Afanasiev S.V., Anisimov Yu.S., Arkhipov V.V., ..., Smirnov V.A. et al.** The Data Acquisition and Trigger Systems for the Forward Detector of the Spectrometer Sphere. - In: Proceedings of the international symposium "Electronic Instrumentation in Physics" Dubna, 14-17 May, 1991. Dubna: JINR, 1991, E13-91-321, p. 85.
23. **Нгуен Фук, Смирнов В.А.** Универсальный драйвер ветви в стандарте КАМАК. - В кн.: Труды VIII Международного симпозиума по ядерной электронике, Дубна, 1975. Дубна: ОИЯИ, 1975, D13-9287, с. 190.
24. **Нгуен Фук, Смирнов В.А.** Модуль управления и модуль задания приоритетов универсального драйвера ветви в стандарте КАМАК. - ПТЭ, 1976, № 3, с. 67.
25. **Нгуен Фук, Смирнов В.А., Хмелевски Е.** Модуль организации ветви универсального драйвера в стандарте КАМАК. - ПТЭ, 1976, № 3, с. 65.
26. **Нгуен Вьет Зунг, Нгуен Фук, Смирнов В.А., Черных Е.В.** Модуль источника управления универсальным драйвером в стандарте КАМАК от ЭВМ ЕС-1010. - Препринт ОИЯИ 10-8971, Дубна, 1975.
27. **Волков В.И., ..., Смирнов В.А., Нгуен Фук.** Система контроля и управления параметрами медленного вывода пучка из синхрофазотрона ОИЯИ. - Сообщение ОИЯИ 9-8910, Дубна, 1975.
28. **Chernykh E.V., ..., Smirnov V.A., Volkov V.I.** The Organization of JINR Proton Synchrotron Beam Slow Extraction Parameter Monitoring and Control System in the CAMAC Standard On-Line with an US1010 Computer. - IEEE Trans. on Nucl. Science, 1977, Vol. NS-24, No.6, p. 2561.
29. **Волков В.И., Куликов И.И., Смирнов В.А.** Организация связи ЭВМ ЕС-1010 с дисплейной станцией ГД-71. - Препринт ОИЯИ 11-10024, Дубна, 1976.

30. Айхнер Г., Алеев А.А., Арефьев В.А., ..., Смирнов В.А. и др. Регистрирующая аппаратура спектрометра БИС-2 ОИЯИ. - Препринт ОИЯИ 10-80-433, Дубна, 1980.
31. Аблеев В.Г., Арефьев В.А., Басиладзе С.Г., ..., Смирнов В.А. и др. Система на 2500 каналов с пропорциональными и дрейфовыми камерами для исследования рассеяния адронов. - Препринт ОИЯИ 13-8967, Дубна, 1975, 12с.
32. Басиладзе С.Г., Смирнов В.А., Юдин В.К. Блок для кодирования и чтения данных с годоскопических систем регистрации в стандарте КАМАК. - ПТЭ, 1977, № 4, с. 97.
33. Basiladze S.G., Smirnov V.A., Yudin V. K. A coding and reading data unit from hodoscopic recording systems in the CAMAC standard. - Nuclear Instruments and Methods, 1977, № 146, p. 587.
34. Базылев С.Н., Колпаков И.Ф., Сеннер А.Е., Смирнов В.А. ЭВМ большой производительности в спектрометрах релятивистских ядер. - В кн.: Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике, 6-12 сентября 1983, Братислава. Дубна: ОИЯИ, 1984, Д13-84-53, с.437.
35. Базылев С.Н., Ефимов Л.Г., Колпаков И.Ф., ..., Смирнов В.А. и др. Организация экспериментов релятивистской ядерной физики на линии с ЭВМ ЕС-1040 в ЛВЭ ОИЯИ. - Сообщение ОИЯИ 10-83-276, Дубна, 1983.
36. Базылев С.Н., Смирнов В.А. Использование VME для автоматизации установок физики высоких энергий ЛВЭ ОИЯИ. - В кн.: XV Международный симпозиум по ядерной электронике и Международный семинар КАМАК-92, Варшава, 29 сентября - 2 октября 1992. Дубна: ОИЯИ, 1993, Д13-92-581, с.188.
37. Smirnov V.A. Some remarks about a DAQ system in LHE JINR. - In: Proc. of the ESONE International Conference RTD'94 on REAL TIME DATA 1994 with emphasis on DISTRIBUTED FRONT-END PROCESSING, JINR, Dubna, Russia, June 27-July 1, 1994. Dubna: JINR, 1995, E10,11-95-387, p. 185.
38. Смирнов В.А. Организация систем сбора данных на основе аппаратуры, выполненной в разных стандартах. - В сб.: XVI международный симпозиум ОИЯИ по ядерной электронике, 12 - 18 сентября 1994, Варна, Болгария. Дубна: ОИЯИ, 1995, D13-94-491, с. 68.

39. Базылев С.Н., Смирнов В.А. Системный контроллер шины VME. - Сообщение ОИЯИ P10-91-32, Дубна, 1991.
40. Смирнов В.А. Устройство сопряжения канала микроЭВМ типа "Электроника-60", "MEPA-60" и "LSI-11" с шиной VME. - Сообщение ОИЯИ P10-91-33, Дубна, 1991.
41. Базылева Н.П., Базылев С.Н., Ефимов Л.Г., ..., Смирнов В.А. Применение шины VME и персонального компьютера Правец-16 в подсистеме управления циклом сверхпроводящего синхротрона. - Краткие сообщения ОИЯИ, 1987, № 6[26]-87, с. 12.
42. Ли Тхе Хва, Смирнов В.А., Энкболд Д. Драйвер ветви КАМАК в стандарте VME. - В кн.: XIV Международный симпозиум по ядерной электронике и Международный семинар КАМАК-90, Варшава, 25-28 сентября 1990. Дубна: ОИЯИ, 1990, Д13-90-600, с.136.
43. Afanasiev S.V., Anisimov Yu.S., Bazylev S.N., ..., Smirnov V.A. et al. An experiment to search cumulative muon pairs with low invariant mass. - JINR Rapid Communication, 1990, №7[46]-90, p.6.
44. Anisimov Yu.S., Bazylev S.N., Enkhbold D., ..., Smirnov V.A. Implementation of VMEbus in Experiments with Relativistic Nuclei. - In: Proc. of an international conference "OPEN BUS SYSTEMS'92 in Research and Industry", Zurich, Switzerland, 13-15 October 1992. The Netherlands: VITA VFEA International Trade Association, 1992, p. 381.
45. Anisimov Yu. S., Kuznetsov V.A., Malakhov A.I., ..., Smirnov V.A. et al. Development of a data acquisition system for the SPHERE spectrometer. - Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, 1995, A 367, p.432.
46. Смирнов В.А. Использование процессорных ферм для отбора событий высокого уровня. - В кн.: Труды XVII Международного симпозиума по ядерной электронике, Варна, 15 -21 сентября 1997 года. Дубна: ОИЯИ, 1998, Д13-98-66, с. 91.
47. Смирнов В.А. Использование микро-ЭВМ 168/E для обработки экспериментальной информации. - В кн.: Труды XI Международного симпозиума по ядер-

ной электронике, 6-12 сентября 1983, Братислава. Дубна: ОИЯИ, 1984, Д13-84-53, с.184.

48. Kolpakov I.F., Senner A.E., Smirnov V.A. A Supercomputer for Parallel Data Analysis. - Communication of JINR E10-87-378, Dubna, 1987.

49. Сеннер А.Е., Смирнов В.А., Трофимов В.В. Многопроцессорная система обработки данных в стандарте VME (прототип). - Краткие сообщения ОИЯИ, 1990, 7(46)-90, с.58.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 ноября 1999 года.